

УДК 629.5.072.1

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПЛОТА В УСЛОВИЯХ ДОЛАМЫВАНИЯ КРОМОК КАНАЛА ПЛОТОМ

Корпачев В.П., Злобин А.А., Ушанов С.В.

ФГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»,  
Красноярск, e-mail: aazlobin@yandex.ru

В работе приведены зависимости полного ледового сопротивления, сопротивления воды и чистого ледового сопротивления движению сегмента плота в ледовом канале шириной, меньшей ширины плота, от толщины битого льда и скорости буксировки. Эксперимент по определению сопротивления движению плота в условиях продленной навигации проводился с использованием моделированного льда и сегмента плота из натурной древесины с линейными размерами  $L \times B \times T$  (2,4×0,6×0,1 м), где  $L$  – длина сегмента плота,  $B$  – ширина сегмента плота,  $T$  – осадка сегмента плота. Приведена методика обработки и оптимизации экспериментальных данных, которые позволили получить уравнения регрессии полного ледового сопротивления, сопротивления воды и чистого ледового сопротивления движению сегмента плота в условиях доламывания кромок канала плотом. Стандартные ошибки моделей полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления, соответственно равны 0,039; 0,039; 2,66, а коэффициенты детерминации – 0,978; 0,999995; 0,975.

**Ключевые слова:** продленная навигация, лесосплав, уравнение регрессии, битый лед, сопротивление, дисперсия

## RESEARCH RESULTS ICE RESISTANCE IN THE RAFT BREACH EDGE CHANNEL

Korpachev V.P., Zlobin A.A., Ushanov S.V.

Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, e-mail: aazlobin@yandex.ru

The paper presents the dependence of the total ice resistance, water resistance and resistance to movement of pure ice raft segment in the ice channel width less than the width of the thickness of the raft of broken ice and towing speed. Experiment to determine the resistance to the motion of the raft under the extended navigation was performed using simulated ice and a segment of a full-scale wood raft with linear dimensions  $L \times B \times T$  (2,4×0,6×0,1 m), where  $L$  – length segment of the raft,  $B$  – width of the segment raft,  $T$  – draught segment raft. The technique of processing and optimization of experimental data, which gave a regression equation of full ice resistance, water resistance and resistance to movement of pure ice raft segment under dolamyvaniya edges channel raft. Standard errors of models full of ice resistance, water resistance, resistance of pure ice, are respectively 0,039; 0,039; 2,66, and the coefficients of determination – 0,978; 0,999995; 0,975.

**Keywords:** prolonged navigation, rafting, regression equation, broken ice, resistance, variance

Несмотря на особую значимость водного транспорта леса в истории развития лесного комплекса России, транспортировка древесины на внутренних водных путях имеет один существенный недостаток – это сезонность работ. Зимой акватория лесосплавной трассы замерзает, в результате чего транспортные работы приостанавливаются либо переводятся на альтернативные виды транспортировки. Благодаря современным средствам и методам борьбы со льдами и более чем вековой историей плавания во льдах, которой не обладает ни одна страна, возможна организация плотового лесосплава в период ледового режима на внутренних водных путях, за счет прокладки канала в ледовом поле в ранневесенний и позднесенний периоды навигации, при относительно небольших толщинах льда и низкой его прочности.

**Цель исследования** – получить математические модели полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления движению плота

в зависимости от толщины льда и скорости буксировки плота.

### Материалы и методы исследования

Как правило, максимальная ширина ледокола составляет не более 10 м, ледовый канал, проложенный таким ледоколом, будет составлять в среднем 11 м. Если же прокладку канала в ледовом поле осуществлять при помощи состава из буксировщика и ледокольно-ледоочистительной приставки, то ширина канала может доходить до 20 метров. При этом ширина стандартных плотов для рек Ангара и Енисей составляет 22 и 44 м соответственно. При таких условиях буксировка возможна при условии доламывания кромок канала плотом (рис. 1).

Последующая буксировка плота будет осуществляться в условиях движения в ледовом канале шириной, большей ширины плота. В силу ограниченности условий проведения опытов была взята модель сегмента плота масштабом 1:15 с линейными размерами  $L \times B \times T$  (2,4×0,6×0,1 м), где  $L$  – длина

сегмента плота,  $B$  – ширина сегмента плота,  $T$  – осадка сегмента плота. Гидродинамические условия смоделированы с учетом критерия подобия Фруда [5]. Для получения опытных данных был проведен полнофакторный трехуровневый эксперимент по определению чистого ледового сопротивления движению плота в ледовом бассейне Арктического и Антарктического научно-исследовательского института [1]. Опыты проводились

с использованием моделированного льда по общепризнанной методике [3, 7, 8]. Модель сегмента плота буксировалась при помощи специальной тележки, несущей на себе измерительную аппаратуру и движущейся вдоль бассейна по рельсам, уложенным по обеим сторонам бассейна, на тележке же находятся экспериментаторы, наблюдающие за аппаратурой и за моделью, внося полученные результаты в журнал (рис. 2).

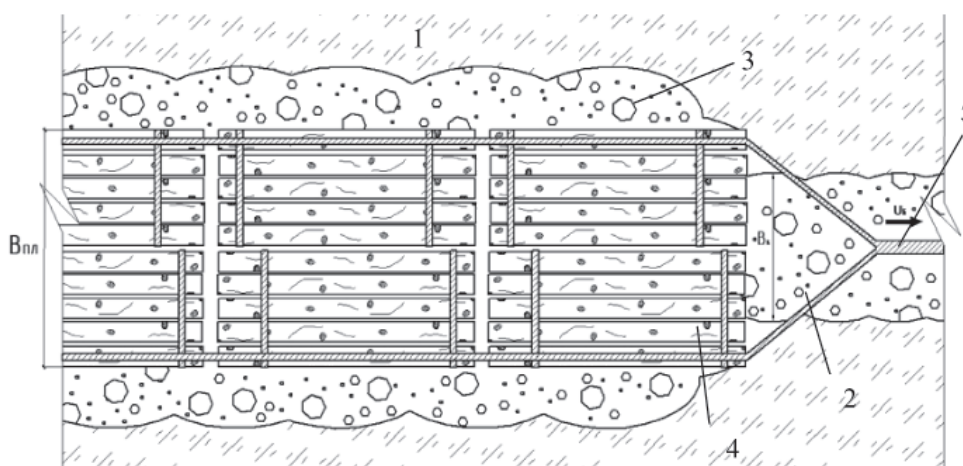


Рис. 1. Доламывание кромок ледового канала  $B < B_k$  плотом при его буксировке: 1 – сплошной неразрушенный лёд; 2 – ледовый канал; 3 – битый лёд; 4 – сегмент плота; 5 – буксировочный трос

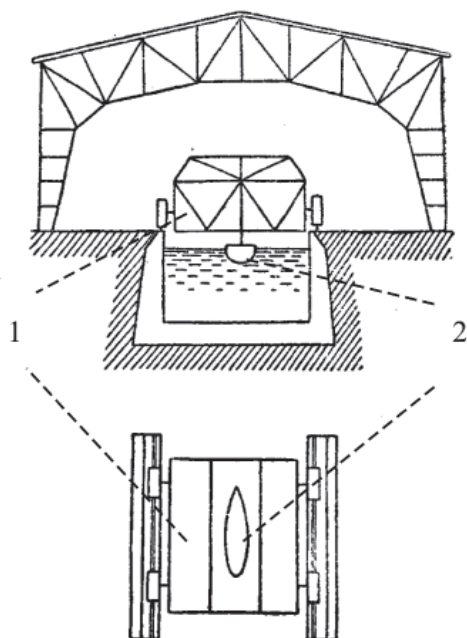


Рис. 2. Схема опытового бассейна ААНИИ, оборудованного специальной тележкой для испытания моделей: 1 – тележка; 2 – модель

В качестве входных регулируемых параметров были приняты (табл. 1):

- Скорость буксировки сегмента плота в ледовом поле ( $v_{пл}$ ) –

$$x_1 = \frac{v_{пл} - 0,2}{0,1}.$$

- Толщина битого льда в канале ( $h_n$ ) –

$$x_2 = \frac{h_n - 0,0185}{0,0035}.$$

Таблица 1

Входные регулируемые параметры эксперимента по определению сопротивления битого льда движению плота

Уровень	Значения факторов		
	$X_i$	$h_n$ , м	$v_{пл}$ , м/с
1	-1	0,015	0,1
2	0	0,0185	0,2
3	+1	0,022	0,3

Функциями отклика связывающие входные параметры, характеризующие результаты эксперимента, с варьируемыми переменными, являются:

- Полное ледовое сопротивление ( $\delta_n$ ), Н.
- Сопротивление воды ( $\delta_b$ ), Н.

– Чистое ледовое сопротивление ( $\delta_{\text{чл}}$ ), Н;  $\delta_{\text{чл}} = \delta_{\text{п}} - \delta_{\text{в}}$ .

При числе параллельных опытов  $m = 30$  и числе уровней каждого фактора, равного трем, получено 270 опытных значений в каждой функции отклика.

Обработка экспериментальных данных проведена в математическом пакете MathCad. Дисперсия воспроизводимости  $S_v^2$  и ошибки опытов (воспроизводимости)  $S_v$ , расчетные значения критерия Кохрена  $G_p$  для полного ледового сопротивления  $\delta_{\text{п}}$ , сопротивления воды  $\delta_{\text{в}}$  и чистого ледового сопротивления  $\delta_{\text{чл}}$  представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

Значения дисперсий воспроизводимости  $S_v^2$  ошибок опытов  $S_v$  и расчетных значений критерия Кохрена  $G_p$  для  $\delta_{\text{п}}$ ,  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{чл}}$

	$\delta_{\text{п}}$	$\delta_{\text{в}}$	$\delta_{\text{чл}}$
$S_{\text{ад}}^2$	0,0017	0,0012	0,0029
$S_v, \text{H}$	0,041	0,034	0,054
$G_p$	0,135	0,184	0,153

Гипотеза однородности дисперсий не отклоняется при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $G_p < G_{\text{таб}} = 0,059$ , где  $G_{\text{таб}}$  – критическое значение критерия Кохрена).

Математическая модель полнофакторного эксперимента, описывающая зависимость ледового сопротивления от рассматриваемых входных величин, содержит 9 коэффициентов регрессии. Матрица функций от входных параметров при коэффициентах модели имеет вид:

$$Kf_0 \leftarrow 1$$

$$Kf_1 \leftarrow x_1$$

$$Kf_2 \leftarrow x_1^2$$

$$Kf_3 \leftarrow x_2$$

$$Kf_4 \leftarrow x_1 \cdot x_2$$

$$Kf_5 \leftarrow x_1^2 x_2$$

$$Kf_6 \leftarrow x_2^2$$

$$Kf_7 \leftarrow x_1 x_2^2$$

$$Kf_8 \leftarrow x_1^2 x_2^2$$

Для оптимизации и сжатия математической модели (уменьшения размерно-

сти ее коэффициентов) принято условие 5 %-й ошибки от среднего значения выходных значений, что допустимо при проведении технологических расчетов лесосплавных работ.

По составленной программе в системе MathCad для каждой из моделей вычислены их коэффициенты матричным методом наименьших квадратов, расчетные значения  $\delta$ , стандартные ошибки коэффициентов, расчетные значения критерия Стьюдента оценки значимости отличия коэффициентов от нуля, дисперсии адекватности, стандартные ошибки и коэффициенты детерминации моделей, проведена оценка адекватности модели по критерию Фишера и выполнена процедура сжатия модели [4, 9].

После выполнения процедуры сжатия в математических моделях  $\delta_{\text{п}}$ ,  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{чл}}$  осталось соответственно 3; 3 и 3 коэффициентов регрессии:

$$\delta_{\text{п}} = 56,9 + 8,9x_1 + 14,3x_2;$$

$$\delta_{\text{в}} = 1,33 + 1,37x_1 + 0,58x_2;$$

$$\delta_{\text{чл}} = 55,18 + 7,54x_1 + 14,3x_2.$$

Результаты сопоставления расчетных и фактических значений  $\delta_{\text{п}}$ ,  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{чл}}$  представлены на рис. 3–5.

Стандартные ошибки (S), коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) и число степеней свободы (f), полученных моделей, представлены в табл. 3.

**Таблица 3**

Характеристики точности моделей  $\delta_{\text{п}}$ ,  $\delta_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{чл}}$ .

	$\delta_{\text{п}}$	$\delta_{\text{в}}$	$\delta_{\text{чл}}$
S	0,039	0,039	2,66
$R^2$	0,978	0,999995	0,975
f	6	6	6

### Выводы

Получены адекватные эксперименту модели полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления движению плота в ледовом канале шириной, меньшей ширины плота, учитывающие скорость буксировки и толщину льда в канале. Результаты обработки опытных данных могут быть применены при организации плотового лесосплава в период продленной навигации.

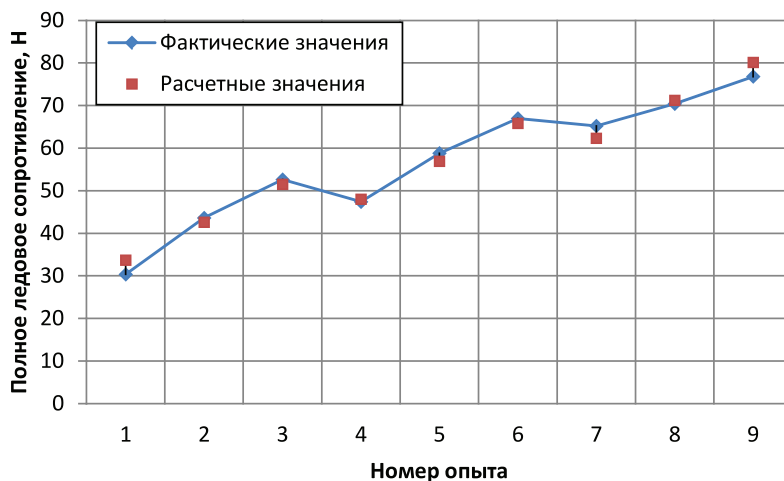


Рис. 3. Расчетные и фактические значения ледового сопротивления движению сегмента плота

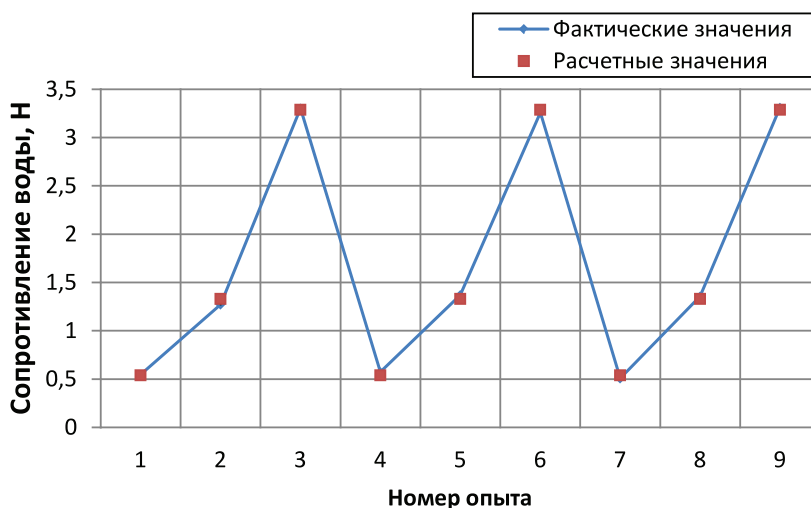


Рис. 4. Расчетные и фактические значения сопротивления воды движению сегмента плота

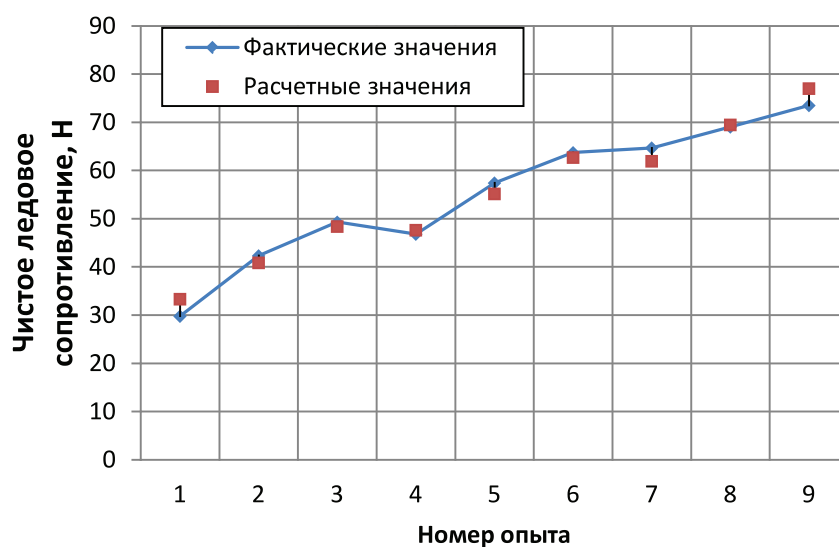


Рис. 5. Расчетные и фактические значения чистого ледового сопротивления движению сегмента плота

### Список литературы

1. Злобин А.А. Максимова Е.М. Исследование ледового сопротивления движению плота в ледовом бассейне ААНИИ / А.А. Злобин, Е.М. Максимова // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2013. – Т. 1 – С. 119 – 122.
2. Зувев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях: монография. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Ионов Б.И. Ледовое сопротивление и его составляющие. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 80 с.
4. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
5. Корпачев В.П. Злобин А.А. Обоснование условий моделирования движения плота в ледовом канале // Хвойные бореальные леса – Красноярск : СибГТУ, 2012. – том XXX № 3-4. – С. 366–369.
6. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса: монография. – М.: Академия Естествознания, 2009. – 237 с.
7. Позняк И.И. Ледовый бассейн и техника проведения в нем модельных испытаний // Труды ААНИИ. Современные вопросы ледоколостроения. – Л.: Изд-во «Морской транспорт». – Т. 237. – С. 46–75.
8. Рывлин А.Я. Испытания судов во льдах. – Л.: Судостроение, 1980. – 208 с.
9. Ушанов С.В. Параметрическая и идентификация моделей. – Красноярск: Антера-принт, 2012. – 212 с.

### References

1. Zlobin A.A. Maximova E.M. Investigation of ice resistance movement in the ice pool raft AARI / A.A. Zlobin, E.M. Maksimov // All-Russian Scientific and Practical Conference «Young scientists in solving actual problems of science». Krasnoyarsk, Univ SibGTU, 2013. Vol. 1. pp. 119–122.

2. Zuev V.A. Means extension of navigation on inland waterways: monograph. Leningrad, Shipbuilding, 1986. 208 p.

3. Ions B.I. Ice resistance and its components. Gidrometeoizdat, 1988. 80 p.

4. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. Moscow, FIZMATLIT., 2006. 816 p.

5. Korpachev V. P. Theoretical Foundations of water transport timber: monograph. Moscow: Academy of Natural Sciences, 2009. 237 p.

6. Korpachev V.P. Zlobin A.A. Justification conditions simulating the movement of the raft in the ice channel // Conifer boreal forests Krasnoyarsk SibSTU, 2012. Vol. XXX no. 3–4. pp. 366–369.

7. Poznyak I.I. Ice pool and techniques of model tests in it // Proceedings of AARI. Contemporary Issues ledokolostroeniya. Leningrad: Publishing House of the «Maritime transport». T. 237. pp. 46–75.

8. Ryvlin A.Y. Test vessels in ice. Leningrad Shipbuilding, 1980. 208 p.

9. Ushanov S.V. Parametric modeling and identification. Krasnoyarsk, Antera-print, 2012. 212 p.

### Рецензенты:

Полетайкин В.Ф., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии и машин природообустройства, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск;

Лозовой В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 26.02.2014.